

早稲田大学大学院国際情報通信研究科

博士論文審査報告書

論文題目

Studies on Mitigation Methods for Fading over a Turbulence
Free-Space Optical Channel

擾乱のある自由空間光チャネル上での
フェーディング軽減方法に関する研究

申請者

Peng	Liu
劉	鵬

国際情報通信学専攻
光電波応用工学研究Ⅱ

2012 年 2 月

近年、インターネットや携帯電話の普及による情報量の増大により、いつでもどこでも瞬時に情報を取得できる超高速情報通信システムの開発が要望されている。この需要を満たすには光ファイバを中心とする超高速ブロードバンドネットワークの利用が有効で、オフィスのみならず家庭にまで導入が進められている。しかしながら、河川、鉄道線路の横断や地下管路など、光ファイバネットワークの建設が困難な地域も多く存在するため、設置が容易で、ライセンスが不要、かつ光ファイバ並みに高速・大容量情報を瞬時に伝送可能な光ワイヤレスシステムの導入に注目が集まり、その実現が期待されている。ファイバー空間—ファイバへと光信号のまま接続する技術の代表的なものには超高速の空間光（FSO : Free Space Optics）通信技術が挙げられ、多くの研究が進められている。この FSO 通信と光ファイバとの接続により、ファイバ故障時のバックアップ、災害時の緊急アクセス、ラストワンマイルなど様々な場面にブロードバンド情報提供の展開が期待されている。しかしながら、FSO 通信システムと光ファイバシステムとの良好な接続が課題になっている。

大気中を伝搬する光は、温度分布の不均一などによる大気の変折率の揺らぎにより、程度の相違はあるがFSO通信区間の伝搬特性の影響を受けている。すなわち、シンチレーションとも呼ばれる強度変動や到来角AOA(Angle Of Arrival)変動などの影響を受け、伝送エラーの増大によるスループットの低下をもたらし、場合によっては瞬断や切断となることもある。実用的なスループット性能を実現するためには、大気擾乱の影響を抑えることが必要である。中でも大気フェージングにより、受光電力が急激に低下することで生じるバーストエラーの軽減をはかることが重要である。強度変調された光が伝搬する場合は、強度揺らぎの影響を軽減するレンズ開口平均技術の使用および通信品質や信頼性の向上をはかる空間ダイバーシチ、時間ダイバーシチなどにより、信号減衰を最小限に抑えるための技術が考案されている。空間ダイバーシチの効果は、理論解析や実験により、チャネル変動を減少できることが確認されているが、複数の送信部、受信部を必要とすることから、装置の小型化、経済化が困難である。これに対して時間ダイバーシチでは、システム内で同時に同一チャネルの送信信号を扱うため空間ダイバーシチに比べて信号処理が容易で、コストパフォーマンスがよいといえる。

本論文は、大気擾乱によって生じるフェージングによる影響を軽減するため、時間ダイバーシチ方式を取上げ、光通信における多重化技術として近年注目を集めている光符号分割多重化（OCDM: Optical Code Division Multiplexing）方式の提案と、受信部の信号入力端における到来角変動の影響を効果的に軽減するための追尾システムについて論じたものである。

本論文は、筆者が本学大学院国際情報通信研究科に在学中に行った研究成果をまとめ

たものであり、理論研究および実験にて得られたデータに基づき、擾乱のある自由空間光チャネル上でのフェージング軽減方法を示したもので、全5章で構成されている。なお、博士論文および概要書ともに英文で記述されている。以下、各章ごとの概要および評価を述べる。

第1章「INTRODUCTION」は序論であり、本研究の背景と研究課題および研究対象を明らかにすると共に、本論文の目的および論文の構成を示している。

第2章「ATMOSPHERIC TURBULENCE」では、関連技術の過去の研究経緯、FSO通信システムの概要と特徴を述べ、読者の理解度向上に役立てている。さらに、FSO通信リンクにおける大気擾乱モデルの説明ならびに到来角変動の発生メカニズムの分析が行われ、大気擾乱に起因する強度変動、到来角変動が情報信号に与える影響が示されている。また、本研究で用いた大気擾乱モデルの特徴を調べるため、1 km 区間の FSO 通信リンクで得られた大気擾乱による実験データの分析を行い、受信電力と受信部のレンズ開口平均および大気擾乱の大きさを示す尺度である屈折率構造定数 C_n^2 の関係を導出している。これらのシミュレーションの分析結果は実際の運用環境において、FSO 通信のシステム設計の最適化のために非常に重要であることが示されており、実用システムの基礎データとして極めて有益な結果が示されたものとして高く評価される。

第3章「FULL OPTICAL TIME DIVERSITY FOR FSO SYSTEM」では、OCDMを使用したFSO通信における新しい時間ダイバーシチ方式が提案されている。提案方式は、光・電気変換を行わない完全光通信システムでの適用した時間ダイバーシチ信号方式である。ここでは、時間と周波数に着目した大気擾乱のシンチレーションを取上げている。シンチレーションのモデルとして対数正規モデルとガンマ・ガンマモデルの場合について理論分析が行われている。大気擾乱チャネルを介して、時間ダイバーシチ方式のビット誤り率特性が分析されている。時間ダイバーシチのシミュレーション結果から大気擾乱に起因するシンチレーションの影響を最小限に抑える効果があることが示されている。この結果、時間ダイバーシチ方式を使用することにより伝送品質を向上させることができることを示しており、提案方式が有効であることを示せたものとして評価に値する。

第4章「TIME-DIVERSITY WITH BEAM TRACKING SUBSYSTEM」では、時間ダイバーシチ構造において、自由空間に光信号を伝送した時の追尾エラーの影響を述べている。特に、追尾エラー、ダイバーシチ信号のコヒーレンスと光検出器ノイズとを考慮した時間ダイバーシチ方式の場合のビット誤り率の定式化を導出している。追尾システムでは、信号光の受信電力と追尾誤りの関係を示すと共に、大気擾乱の強さを考慮

したモデルのシミュレーション結果ならびに実験データの解析結果により、時間ダイバーシチが FSO 通信システムの信頼性を向上させるための有効な技術であることが示されている。本章における結果は、FSO 通信リンクにおける追尾システム導入の有効性を論じており、システム設計の基礎として役に立てることができるものとして、高く評価できる。

第5章「CONCLUSION」は結論であり、本研究で得られた結果の重要な分析および今後の研究領域と課題が述べられている。

以上、要するに本論文は、FSO通信リンクにおける大気擾乱の影響の軽減をはかるため、新たなOCDM方式による時間ダイバーシチの導入効果と追尾方式の性能評価を、理論分析と実験にて得られたデータに基づき分析したものである。大気擾乱モデルを弱、通常、強の場合に分けて、大気擾乱における受信電力分布が分析されている。FSO通信リンクの評価は最終的にそのリンクがどの程度通信の継続性、信頼性が維持できるかに関係する。シミュレーション結果は、FSO通信システムにおいて時間ダイバーシチ技術を用いることによって所要電力利得が得られることを示している。すなわち、時間ダイバーシチ技術を使用することにより、ビット誤り率特性の改善がはかられ、大幅な電力利得向上を提供することができ、安定したFSO通信リンクを実現できることが示されている。得られた結果は、今後、FSO通信システムの性能評価に使用できることから、FSO通信システム構築の基礎を示したものとして高く評価できる。すなわち、国際情報通信学の発展に寄与するところ極めて大きい。よって、本論文は博士（国際情報通信学）の学位を授与するに値するものと認める。

2012年2月24日

審査員

(主任) 早稲田大学教授 博士（工学）（早稲田大学）	松本 充司
早稲田大学教授 工学博士（新潟大学）	佐藤 拓朗
早稲田大学教授 工学博士（東北大学）	嶋本 薫
早稲田大学教授 工学博士（早稲田大学）	朴 容震